

不同条件对溶液吸收 - 电芬顿技术净化空气中颗粒物和甲醛效果的影响

李承钰, 刘金梅, 李欣宇, 惠 帅, 邹昊洋, 陈兴都

西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月16日

摘 要

颗粒物和甲醛作为目前重点的空气污染物, 对人们的身体健康和社会发展存在严重危害, 但目前的空气净化方式大多存在效率低、成本高、材料无法循环利用等问题。为此, 本实验利用溶液吸收 - 电芬顿设备, 通过设备内聚吡咯薄膜分割气体产生微小气泡吸收污染物, 再利用电芬顿技术进行氧化分解, 测试了初始进气浓度、气体流量、电流强度对不同粒径颗粒物和甲醛的去除情况的影响。结果表明, 在颗粒物初始进气浓度200 ppm, 甲醛初始进气浓度0.48 mg/m³, 气体流量300 ml/min, 电流强度150 mA时去除效果最佳, 吸收过程均符合一级动力学模型, 具有良好的净化效果。

关键词

颗粒物, 甲醛, 去除效果, 聚吡咯薄膜, 溶液吸收 - 电芬顿

The Effect of Different Conditions on the Purification of Solution Absorption-Electric Fenton Technology on Particulate Matter and Formaldehyde in the Air

Chengyu Li, Jinmei Liu, Xinyu Li, Shuai Hui, Haoyang Zou, Xingdu Chen

School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 2nd, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

Particulate matter (PM) and formaldehyde, as key air pollutants, pose significant threats to human health and societal development. However, current air purification methods often suffer from limita-

文章引用: 李承钰, 刘金梅, 李欣宇, 惠帅, 邹昊洋, 陈兴都. 不同条件对溶液吸收-电芬顿技术净化空气中颗粒物和甲醛效果的影响[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 745-755. DOI: 10.12677/aep.2025.155084

tions such as low efficiency, high costs, and non-recyclability of materials. To address these challenges, this experiment employed a solution absorption-electro-Fenton system. The device utilized a polypyrrole film to partition the gas stream into micro-bubbles for pollutant absorption, followed by oxidative degradation via electro-Fenton technology. The effects of initial inlet concentration, gas flow rate, and current intensity on the removal efficiency of different sized particulate matter and formaldehyde were systematically investigated. Results demonstrated optimal performance under the following conditions: initial PM concentration of 200 ppm, formaldehyde concentration of 0.48 mg/m³, gas flow rate of 300 mL/min, and current intensity of 150 mA. The absorption process adhered to first-order kinetics, exhibiting excellent purification efficacy.

Keywords

Particulate Matter, Formaldehyde, Removal Effect, Polypyrrole Thin Film, Solution Absorption-Electric Fenton

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代经济发展和城市建设的飞速进行,众多新兴产品进入我们的生活环境,带来便利的同时也引起了严重的室内空气污染。其中可吸入颗粒物和甲醛作为重点的空气污染物[1]-[5],会对人们的身体健康产生严重危害[6],还会通过影响人的工作效率、增加医疗负担等危害社会发展[7],亟待解决。

目前,对于室内空气中颗粒物和甲醛的常用处理方法有过滤法[8]、吸附法[9]、光催化氧化法[10]和化学分解法等。其中,传统物理过滤法对超细颗粒物过滤效率有限,且滤网易堵塞,需定期更换;吸附法常用的活性炭材料易饱和,再生技术仍不成熟,使用更换频繁且使用成本较高;光催化氧化技术依赖特定光源及催化剂,且有产生有害中间产物的可能;化学分解法所用复合制剂成本较高,且所需分解时间较长。对于两者的协同处理,目前多见于大型集成空气净化系统,利用多种处理方式进行结合,设备体积大,能耗高,所需成本巨大。

溶液吸收-电芬顿装置利用其内部的聚吡咯薄膜将污染气体分割为微小气泡,通过功能溶液可有效吸收颗粒物、甲醛和 H₂S 等空气污染物,电芬顿技术以 Na₂SO₄ 和 FeSO₄ 混合溶液为电解液,通过生成 ·OH 对污染物进行高级氧化降解。可实现对不同初始浓度的颗粒物和 H₂S 的去除率均在 80%以上,且具有良好的循环使用性,可长期高效氧化降解污染物[11]。

本实验针对室内空气中多粒径的颗粒物和甲醛进行进一步研究,考察了溶液吸收-电芬顿实验设备对于不同粒径颗粒物和甲醛的净化性能,探究了污染物初始进气浓度、气体流量、电流强度的变化对不同粒径颗粒物及甲醛吸收处理效果的影响,研究了溶液吸收-电芬顿系统对于空气中颗粒物和甲醛去除效果的稳定性,为溶液吸收-电芬顿协同技术净化室内空气提供新的解决思路。

2. 材料与方法

2.1. 主要试剂与仪器

2.1.1. 实验试剂

Na₂SO₄、FeSO₄·7H₂O、甲醛等药品均为分析纯,来自天津市科密欧化学试剂有限公司。实验所用水

均为超纯水。实验所用颗粒物为香烟自制烟尘颗粒物。

2.1.2. 实验设备

TVOC 固定式气体检测仪(APEG-TTVOC-X, 深圳市安帕尔科技有限公司), CH₂O 固定式气体检测仪(APEG-CH₂O-2X, 深圳市安帕尔科技有限公司), GT1000 激光粉尘检测仪(深圳市科尔诺电子科技有限公司)。

2.1.3. 实验材料

钉铈钛电极来自北京精科科仪科学仪器有限公司; 碳毡(厚度 3 mm)来自江苏泽宇森碳纤维科技股碳份有限公司。

2.2. 实验装置和工艺流程

溶液吸收 - 电芬顿实验设备结构如图所示(图 1), 利用该设备与气体箱连接进行实验。气体箱中放置自动监测仪实时监测实验过程中颗粒物和甲醛浓度变化; 实验设备为 ELBS 装置和电芬顿装置的组合, ELBS 装置内置聚吡咯薄膜, 电芬顿装置以碳毡为阴极, 钉铈钛金属板为阳极, 板间距为 15 mm; 设备中加入 Na₂SO₄ 和 FeSO₄ 混合溶液为功能溶液。实验进行时先使颗粒物和甲醛在气体箱内达到一定的稳定浓度, 通过蠕动泵使气体从实验设备下方通入, 经过聚吡咯薄膜分割形成微小气泡, 在上浮过程中利用功能溶液吸收气体中的颗粒物和甲醛, 净化后的气体从设备顶部出气管回流至气体箱, 电芬顿装置则利用其产生的 ·OH 氧化处理功能溶液中吸收的污染物, 保证功能溶液的长久使用。

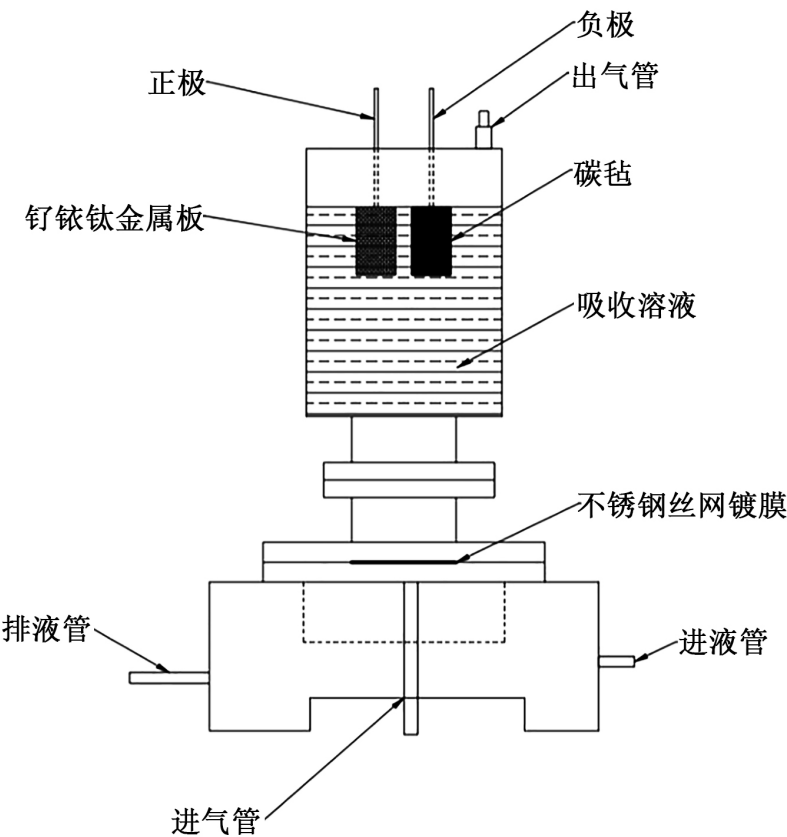


Figure 1. Schematic diagram of purification unit
图 1. 净化装置简图

2.3. 颗粒物和甲醛的吸收实验条件

吸收处理装置所用的功能溶液为 $0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 0.3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ FeSO}_4$ ，颗粒物和甲醛的各组实验条件如表 1 所示。

Table 1. Experimental conditions for each group
表 1. 各组实验条件

污染物	起始浓度	气体流量(ml/min)	电流强度(mA)
颗粒物	200 ppm	100	150
	700 ppm		
	1200 ppm		
	700 ppm	100	150
		200	
		300	
	700 ppm	100	150
			200
			250
甲醛	0.48 mg/m ³	300	150
	0.98 mg/m ³		
	1.95 mg/m ³		
	0.90 mg/m ³	100	150
		200	
		300	

以香烟燃烧产生的烟雾模拟颗粒物。气体箱中放置激光粉尘检测仪实时监测颗粒物浓度变化，去除效率通过公式(1)计算。实验测定颗粒物粒径分别为 PM0.3、PM1.0、PM2.5、PM10，以颗粒物初始进气浓度、气体流量和电流强度为影响因素，研究颗粒物的吸收效果，对颗粒物吸收进行动力学拟合，并对各影响因素进行显著性检验。

$$\eta_{PM} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中， η_{PM} 是颗粒物的去除效率， C_0 为颗粒物初始进气浓度， C_t 为经 t 分钟处理后的颗粒物浓度，ppm。

气体箱中甲醛浓度由气体检测仪实时监测，去除效率通过公式(2)计算。以甲醛初始进气浓度和气体流量为影响因素，研究对甲醛的吸收效果，对吸收结果进行动力学拟合，并对各影响因素进行显著性检验。

$$\eta_{\text{甲醛}} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中， $\eta_{\text{甲醛}}$ 是甲醛的去除效率， C_0 为甲醛初始进气浓度， C_t 为经 t 分钟处理后的甲醛浓度，mg/m³。

对于一级反应，将速率方程进行分离变量并积分后可得到公式(3)，由此对实验数据进行一级动力学拟合，反映去除效果。

$$\ln C_t = -kt + \ln C_0 \quad (3)$$

其中 C_0 为初始进气浓度， C_t 为经 t 分钟处理后的污染物浓度， k 为速率常数。

2.4. 分析方法

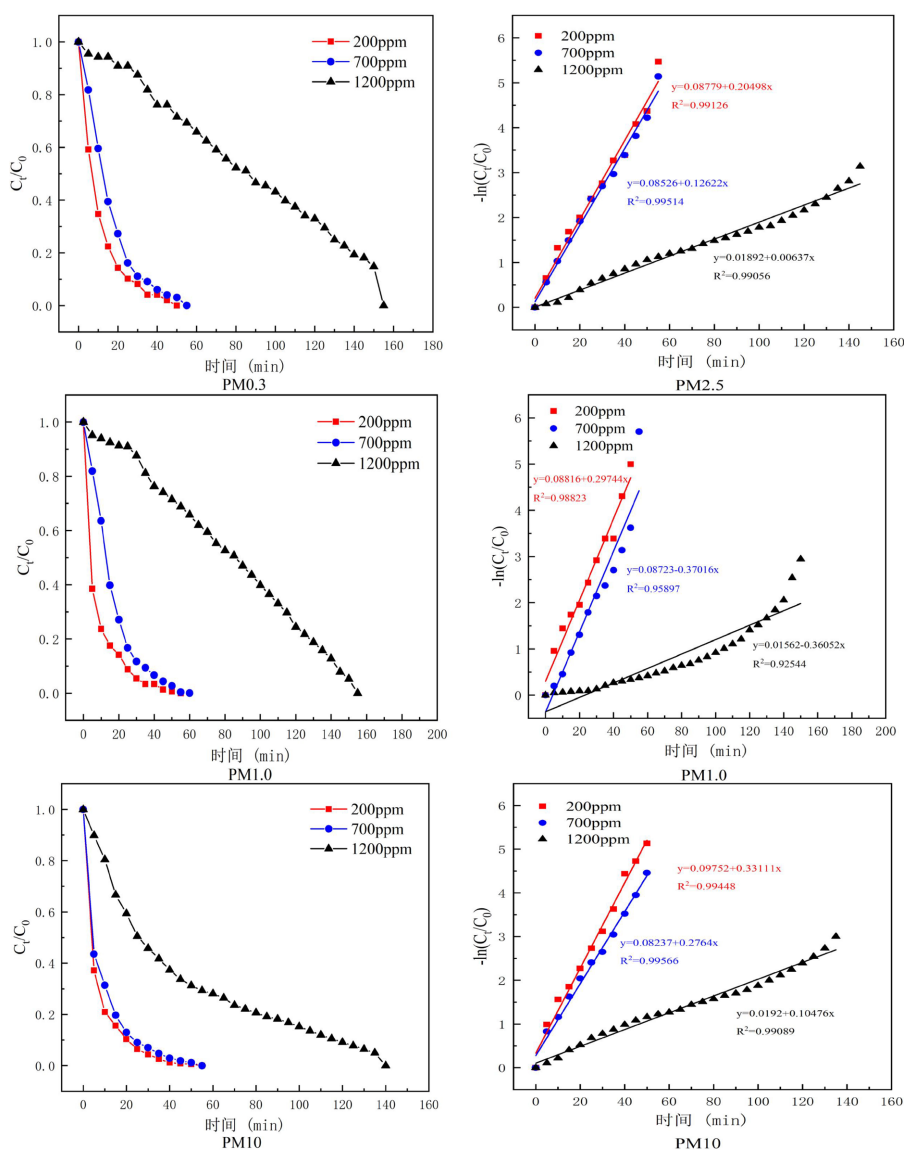
使用 IBM SPSS (Statistics 26)分析实验数据；使用 Origin (2018)绘图。

3. 结果与讨论

3.1. 吸收净化装置对颗粒物的吸收与动力学拟合

3.1.1. 颗粒物初始进气浓度影响

气体流量为 100 ml/min, 电流强度为 150 mA, 测定了在 200 ppm、700 ppm 和 1200 ppm 三个不同初始进气浓度下, 不同粒径的颗粒物浓度变化以及吸收过程中一级动力学拟合情况, 结果如图 2 所示。随着吸收时间的延长, 气体箱内各粒径的颗粒物浓度均呈现下降的趋势。初始进气浓度为 200 ppm、700 ppm、1200 ppm 时 PM0.3 去除数据的一级动力学 k 值分别为 0.0822、0.0731、0.0117, 表明颗粒物初始进气浓度越低, 去除效果越好, 其他粒径颗粒物去除数据也符合该规律。各粒径颗粒物在不同初始进气浓度下的一级动力学拟合系数(R^2)均大于 0.9, 表明各粒径颗粒物的去除基本符合一级动力学。颗粒物初始进气浓度与去除率相关性显著($p=-0.821, r<0.01$), 随着初始进气浓度的增大, 颗粒物去除率下降, 可能原因是进气浓度较低时, 颗粒物在气液界面间分布较稀疏, 使其与功能溶液的接触率提升, 有利于吸收去除。



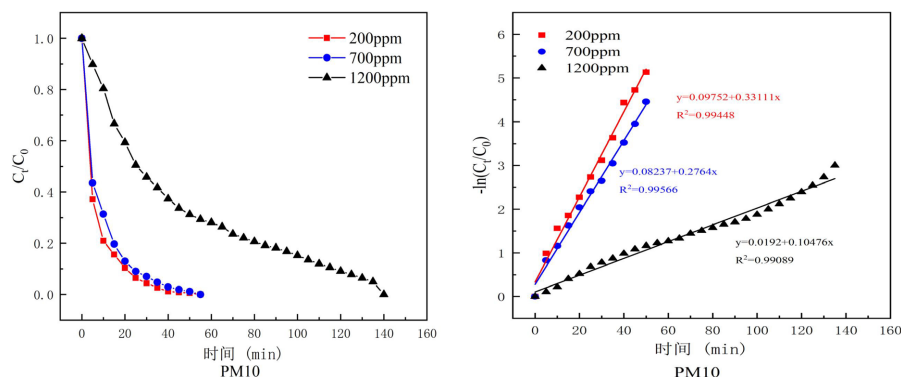
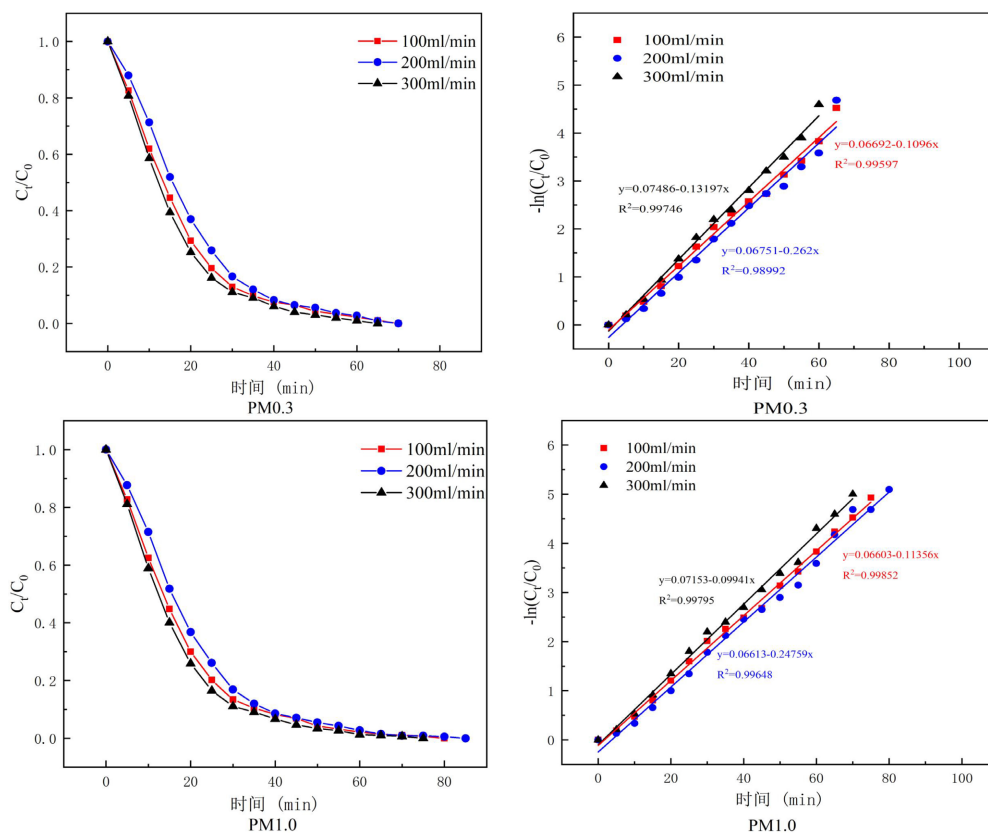


Figure 2. Effect of initial inlet air concentration on absorption and kinetic fitting of particulate matter of different particle sizes
图 2. 初始进气浓度对不同粒径颗粒物的吸收与动力学拟合的影响

3.1.2. 气体流量影响

初始进气浓度为 700 ppm，电流强度为 150 mA，测定了在 100 ml/min、200 ml/min 和 300 ml/min 三个气体流量下不同粒径的颗粒物浓度变化以及吸收过程中一级动力学拟合情况，结果如图 3 所示。随着吸收时间的延长，气体箱内各粒径的颗粒物浓度均呈现下降的趋势。气体流量为 100 ml/min、200 ml/min、300 ml/min 时 PM0.3 去除数据的一级动力学 k 值分别为 0.06692、0.06751、0.07486，可见虽然气体流量越大，去除效果越好，但总体影响较小，其他粒径颗粒物去除数据也符合该规律。不同气体流量下的动力学拟合系数(R^2)均大于 0.9，表明各粒径颗粒物的去除符合一级动力学。气体流量与去除率相关性不显著($p = 0.227, r > 0.01$)，随着气体流量的增大，颗粒物去除率上升较小。



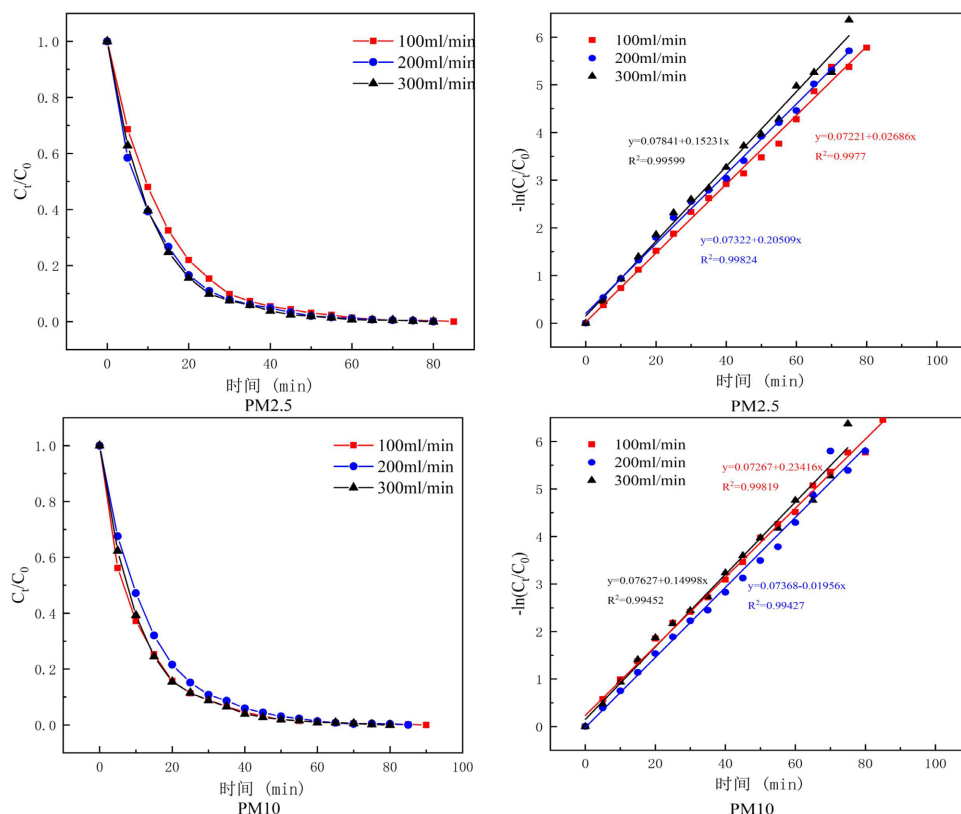
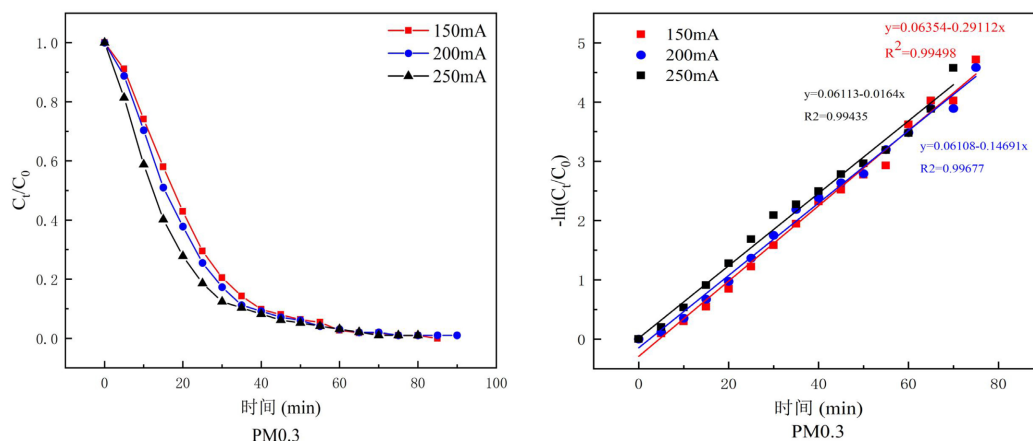


Figure 3. Effect of gas flow on the absorption and kinetic fitting of particulate matter of different particle sizes
图 3. 气体流量对不同粒径颗粒物的吸收与动力学拟合的影响

3.1.3. 电流强度影响

初始进气浓度为 700 ppm，气体流量为 100 ml/min，测定了在 150 mA、200 mA 和 250 mA 三个电流强度下不同粒径的颗粒物浓度变化以及吸收过程中一级动力学拟合情况，结果如图 4 所示。随着吸收时间的延长，气体箱内各粒径的颗粒物浓度均呈现下降的趋势。其中 PM0.3、PM1.0、PM10 一级动力学 k 值为 150 mA > 250 mA > 200 mA，PM2.5 为 150 mA > 200 mA > 250 mA，不同电流强度下的动力学拟合系数 (R^2) 均大于 0.9，表明各粒径颗粒物的去除符合一级动力学。数据统计分析结果表明电流强度与去除率相关性不显著 ($p = -0.137, r > 0.01$)。



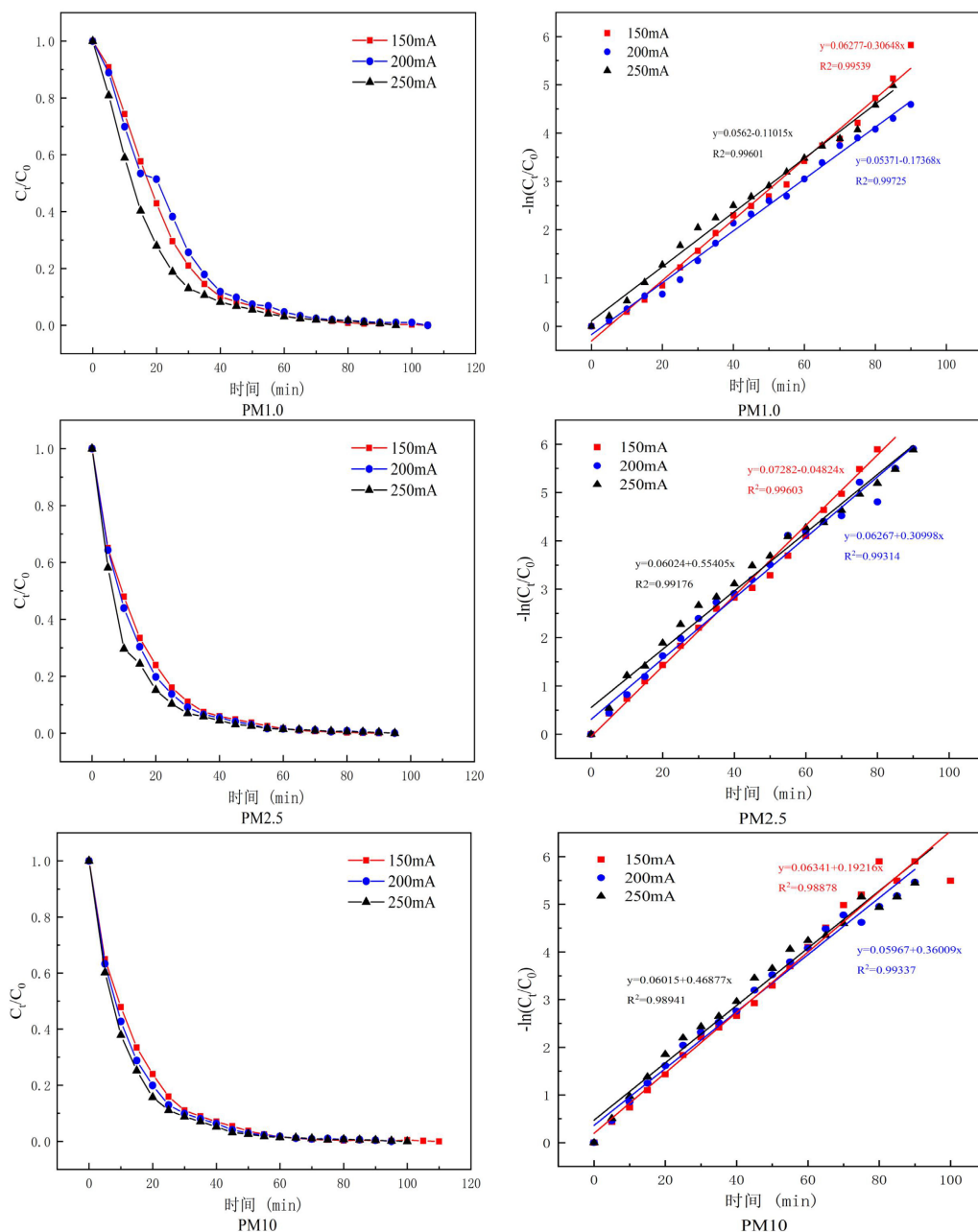


Figure 4. Effect of current intensity on the absorption and kinetic fitting of particles of different particle sizes
图 4. 电流强度对不同粒径颗粒物的吸收与动力学拟合的影响

3.2. 吸收净化装置对甲醛的吸收与动力学拟合

3.2.1. 甲醛初始进气浓度影响

气体流量为 300 ml/min, 电流强度为 150 mA, 测定了在 0.48 mg/m³、0.98 mg/m³ 和 1.95 mg/m³ 三个不同初始进气浓度下, 甲醛浓度随时间的变化以及吸收过程中一级动力学拟合情况, 结果如图 5 所示。随着吸收时间的延长, 气体箱内甲醛浓度均呈现下降的趋势, 初始进气浓度为 0.48mg/m³、0.98 mg/m³ 和 1.95 mg/m³ 时甲醛去除数据的一级动力学 k 值分别为 0.03034、0.01997、0.01731, 可见初始进气浓度越低, 去除效果越好。不同甲醛初始进气浓度下的动力学拟合系数(R²)均大于 0.9, 表明各粒径颗粒物的去

除符合一级动力学。甲醛初始进气浓度与去除率相关性不显著($p = -0.201, r > 0.05$), 这是由于电芬顿能够及时高效的将吸收溶液中的甲醛进行高级氧化从而彻底去除, 甲醛难以从溶液中逃逸到空气中。

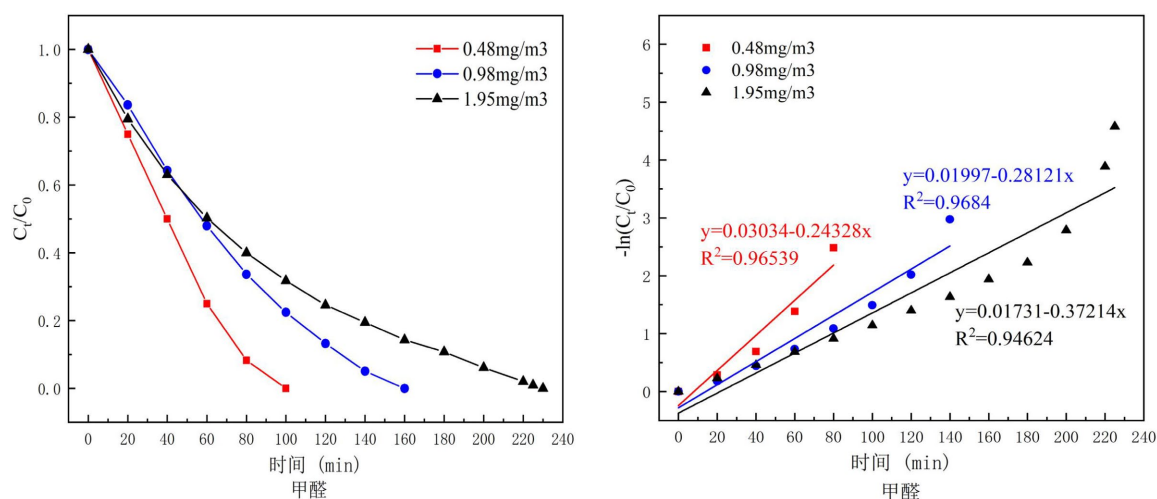


Figure 5. Effect of initial inlet air concentration on formaldehyde absorption and kinetic fitting

图 5. 初始进气浓度对甲醛的吸收与动力学拟合的影响

3.2.2. 气体流量影响

初始进气浓度为 0.90 mg/m^3 , 电流强度为 150 mA , 测定了在 100 ml/min 、 200 ml/min 和 300 ml/min 三个气体流量下甲醛浓度变化以及吸收过程中一级动力学拟合情况, 结果如图 6 所示。随着吸收时间的延长, 气体箱内甲醛浓度均呈现下降的趋势。气体流量为 100 ml/min 、 200 ml/min 、 300 ml/min 时去除数据的一级动力学 k 值分别为 0.00727 、 0.01587 、 0.02011 , 可见气体流量越大, 去除效果越好。不同气体流量下的动力学拟合系数(R^2)均大于 0.9 , 表明不同气体流量下甲醛的去除基本符合一级动力学。统计学分析表明气体流量对甲醛去除率有较显著影响($p = 0.885, r < 0.05$), 原因是气体流量增加会增强湍流, 提升甲醛从气相到液相的传质效率, 相同时间内流量越大净化速率越快, 因此气体流量增加可显著影响去除率。

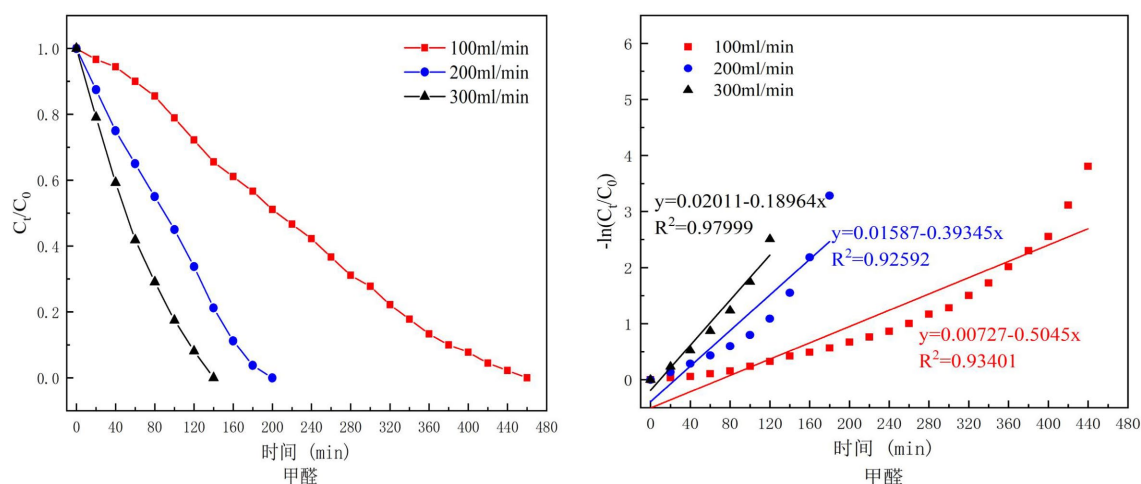


Figure 6. Effect of gas flux on formaldehyde absorption and kinetic fitting

图 6. 气体流量对甲醛的吸收与动力学拟合的影响

3.3. 吸收净化装置对颗粒物和甲醛的吸收机理

空气中颗粒物通过分割成的细小气泡表面与液膜接触, 粒径较大的颗粒物如 PM₁₀ 惯性大, 易与液滴碰撞被捕集吸收, 而小颗粒物如 PM_{2.5}、PM_{1.0}、PM_{0.3} 扩散性较强, 通过布朗运动扩散至气液界面, 被功能溶液捕获去除, 通过将气体分割为细小气泡增加其与功能溶液接触面积, 从而实现颗粒物从气相到液相的转移[12]-[15]。

甲醛作为极性小分子, 可通过物理溶解作用进入液相, 同时发生水合反应而被功能溶液吸收[16][17]。电芬顿阴极利用 O₂ 通过两电子还原反应生成 H₂O₂, 溶液中的 Fe²⁺催化 H₂O₂ 生成高活性 ·OH, 在一定电流强度下该过程可稳定产生 ·OH [18] [19], 甲醛被 ·OH 攻击碳氢键生成中间产物甲酸等, 之后再被进一步氧化为 CO₂ [20] [21], 以此降解功能溶液中的甲醛分子, 可保证吸收净化效果。

4. 结论与展望

(1) 不同粒径颗粒物初始进气浓度与去除率显著负相关, 初始进气浓度越低, 颗粒物的去除率越高, 而气体流量和电流强度与颗粒物去除率相关性不显著。甲醛去除率和气体流量显著正相关, 和初始进气浓度相关性不显著。

(2) 溶液吸收 - 电芬顿技术可通过功能溶液吸收和电芬顿氧化作用高效去除空气中不同粒径的颗粒物及甲醛, 净化效果良好。

(3) 溶液吸收 - 电芬顿系统将功能溶液吸收技术与电芬顿氧化技术相结合, 实现了高效可循环地对空气中污染物进行去除, 未来可在提升 ·OH 产生效率、调整功能溶液配比、提升装置适应性等方面继续深入研究, 根据不同场所的净化需求进行调整, 实现污染空气的高效净化。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划(SSRT)项目(项目编号: 202410703050)——一种基于溶液吸收 + 电芬顿技术的新型空气净化系统构建。

参考文献

- [1] 罗小龙. 大气环境颗粒物污染预防与治理[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(12): 95-97.
- [2] 全海芹, 高彦峰. 室内空气污染及净化方法综述[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(S1): 254-262.
- [3] 张婧琳, 焦琳. 晋中市颗粒物环境空气质量现状及污染治理方向分析[J]. 山西化工, 2025, 45(2): 274-276.
- [4] 蔡志峰. 基于国家标准的甲醛检测及去除技术研究——室内空气安全性评估[J]. 中国品牌与防伪, 2024(10): 46-47.
- [5] Niu, X., Ju, T., Li, B., *et al.* (2024) Characteristics, Future Trends, and Transport Path Analysis of Atmospheric Formaldehyde Pollution: A Case Study of Argentina. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, 6, 43-53.
- [6] 朱毅翔, 阚海东. 大气环境影响人群健康的研究进展与展望[J]. 兰州大学学报(医学版), 2025, 51(1): 1-11+25.
- [7] González-Martín, J., Kraakman, N.J.R., Pérez, C., Lebrero, R. and Muñoz, R. (2021) A State-of-the-Art Review on Indoor Air Pollution and Strategies for Indoor Air Pollution Control. *Chemosphere*, 262, Article 128376. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128376>
- [8] 王凯. PS/PHMS 多尺度纳米纤维膜的制备及空气过滤应用[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- [9] 王阳阳. 微介孔软木活性炭制备及其对游离甲醛吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [10] 任越洋, 魏婕. 光催化氧化技术在处理甲醛中的研究进展[J]. 辽宁化工, 2023, 52(7): 1054-1057.
- [11] 卢金锁, 马新婷, 姜昊, 等. 溶液吸收-电芬顿工艺对空气中颗粒物和 H₂S 的去除性能与降解机理[J]. 环境工程, 2024, 42(12): 155-165.
- [12] Zhang, Y., Han, Y., Ji, X., Zang, D., Qiao, L., Sheng, Z., *et al.* (2022) Continuous Air Purification by Aqueous Interface

- Filtration and Absorption. *Nature*, **610**, 74-80. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05124-y>
- [13] 曾雪花. 基于大气状态的室内细颗粒物去除特征研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [14] 刘金凤, 崔占良. 浅议大气颗粒物的去除方式[J]. 科技信息, 2014(6): 251.
- [15] 陈静书, 战德胜, 杨翔宇, 等. 几种表面活性剂对大气颗粒物去除效果的比较[J]. 科技创新与应用, 2015(16): 76.
- [16] Zhai, Z., Li, Y., Li, Z., *et al.* (2025) Enzymatic Cleanup of Formaldehyde in Aqueous Solutions. *ChemSusChem*, **2025**, e202402711.
- [17] 任天翼, 郭斌, 韩永辉. 水吸收 VOCs 技术应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(5): 16-18.
- [18] 高康健, 杨紫怡, 钟海红, 等. 三维电芬顿技术在难降解有机废水处理中的研究进展[J]. 水处理技术, 2025, 51(2): 29-36.
- [19] Babu, D.S., Srivastava, V., Nidheesh, P.V. and Kumar, M.S. (2019) Detoxification of Water and Wastewater by Advanced Oxidation Processes. *Science of The Total Environment*, **696**, Article 133961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133961>
- [20] 刘俊逸, 张晓昀, 李杰, 等. 室内甲醛污染物高效治理新技术研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(8): 2101-2106+2111.
- [21] Hu, Z., Lai, S., Chen, Y., Wang, S., Wang, C., Wang, X., *et al.* (2024) Mechanisms of Efficient Indoor Formaldehyde Removal via Electro-Fenton: Synergy in $\cdot\text{OH}$ Generation and Utilization through a Modified Carbon Cathode. *Environmental Pollution*, **351**, Article 124090. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124090>